

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLOGICA DEL AFLORAMIENTO DE AGUAS SUBTERRANEAS Y LIMO BLANQUECINO EN LA QUEBRADA CHICAHUAYCCO - APURIMAC

Fluquer Peña¹, Carlos Benavente¹ & Wai Long Ng¹

(1) INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima; fpena@ingemmet.gob.pe; cbenavente@ingemmet.gob.pe & wng@ingemmet.gob.pe

INTRODUCCIÓN

En julio del 2011, un fenómeno inusual se presentó en el piso de valle de la quebrada Chichahuaycco, la surgencia de agua subterránea y lodo, que dejó sedimentos de limo color blanquecino, manchando el curso de agua en la quebrada. En este sector se encuentra también el Proyecto de Exploración Millo, del Consorcio Minero Horizonte, quienes desde el año 2005 vienen realizando trabajos de exploración con el objetivo de delimitar cuerpos mineralizados y cuantificar las reservas, que posibilite la viabilidad del Proyecto. La Quebrada Chinchahuaycco se ubica en el distrito de Oropesa, provincia de Antabamba, Región Apurímac, lugar donde las perforaciones diamantinas de exploración se vienen desarrollando continuamente. El trabajo desarrollado por el INGEMMET consistió en un análisis geológico, hidrogeológico, hidroquímico y estructural, para determinar si los lodos de perforación utilizadas en la exploración del Proyecto Millo tienen alguna relación con los lodos de la surgencia.

METODOLOGIA DE TRABAJO

Se desarrollaron trabajos de campo consistentes en el reconocimiento de unidades lito-estratigráficas, fallas mayores en el área, pruebas de campo y toma de muestras para determinar la composición físico-química de las aguas subterráneas y de los afloramientos de aguas y lodos, así como análisis de los lodos de retorno utilizados en las perforaciones de exploración. Las muestras extraídas corresponden a cuatro puntos (entre aguas y lodos) ubicados en el área de influencia de la surgencia de aguas y lodos. Para muestras de aguas se consideraron tres puntos y para muestras de lodos dos, siendo el punto común Chi_1, de donde se extrajo muestras de agua y lodo simultáneamente. Las muestras de aguas se tomaron del mismo punto de surgencia (Chi_1), de una fuente termal cercana a la surgencia (Chi_2) y de la fuente termal Yumire (Chi_4), ubicada a 3,5 km aguas abajo de la surgencia. El muestreo de lodos se tomó en el punto de surgencia de aguas y lodos (Chi_1) y en una de las pozas de sedimentación de lodos de retorno ubicado cerca a las perforaciones (Chi_3). Ambos muestreos tienen como objetivo establecer comparaciones de las propiedades fisicoquímicas y los analizar los valores de correspondencia de cada fuente.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

GEOLOGÍA DE ÁREA

Desde el punto de vista regional, la zona estudiada se ubica en la Cordillera Occidental de los Andes, en un valle glacial en forma de U, rodeada por relieves montañosos y morrenas laterales desarrolladas sobre rocas volcánicas del Cenozoico. La parte baja de la quebrada Chichahuaycco se ubica en una depresión totalmente anegada, producto de los deshielos y de la surgencia esporádica de manantiales, así mismo se observa la presencia de una terraza formada por efecto de la erosión glacial, lugar en donde se ubica el campamento del Proyecto Millo (Foto 1).

En las inmediaciones del proyecto, se observan areniscas blancas, intercaladas con lutitas grises hacia la base e intercalaciones de lutitas rojizas con niveles delgados de lutitas verdes hacia el techo, pertenecientes a la Formación Murco. Suprayaciendo a esta secuencia se tienen calizas grises con nódulos de chert y venillas de calcita de la Formación Alcurquina, ambas formaciones de ambientes marinos y edad cretácica



Foto 1. Valle en forma de U, rodeado por rocas volcánicas (Grupo Tacaza), donde se ubica el Proyecto Millo.

(Palacios, 1993). Rocas volcánicas del Grupo Tacaza sobreyacen en discordancia angular a la Formación Alcurquina, por su modo y ambiente de depositación, las facies del Grupo Tacaza son permeables y en el caso de las lavas de la secuencia superior, presentan permeabilidad secundaria adquirida por las fracturas. Así mismo se identificaron dos secuencias del Grupo Barroso (Palacios, 1993) que presentan permeabilidad secundaria similar a las lavas del Grupo Tacaza. Finalmente, afloran depósitos cuaternarios de origen glacial y fluvio-glacial, las morrenas están constituidas por conglomerados, arenas, arcillas y esporádicos bloques subangulosos que se presentan en forma alargada (morrenas laterales) y/o en forma de media luna (morrenas frontales). Los depósitos fluvio-glaciares se localizan en las zonas más bajas del área, en los valles jóvenes constituidos por gravas, limos, arenas, arcillas, bloques y fragmentos acarreados por las corrientes de deshielo. Por estos materiales surgió el agua subterránea y lodos blanquecinos, objeto de la presente evaluación (Foto 2). Dos principales sistemas de fallas se identificaron en la quebrada, un primer sistema con dirección NO-SE y un segundo sistema con direcciones E-O. Las fallas de dirección NO-SE son estructuras longitudinales, tienen la dirección del valle principal y constituyen fallas regionales que cruzan toda el área de estudio. La estructura más resaltante es la falla Chichahuaycco, tiene rumbo de N 170° y buzamiento de 78° SO, evidenciado por la presencia de un gouge de falla de 6 metros de ancho, esta falla afecta a las rocas del Grupo Tacaza con un movimiento dextral, su continuidad hacia el norte se encuentra cubierta por los depósitos fluvio-glaciares cuaternarios. El análisis microtectónico indica dos familias de estrías, unas horizontales y relacionadas con un movimiento de rumbo dextral y un segundo juego con estrías oblicuas, cortando las estrías horizontales, sugiriendo un movimiento de tipo inverso con componente sinistral. Las fallas de dirección E-O, son estructuras transversales al valle Chichahuaycco, constituyen fallas de menor orden, entre las estructuras más resaltantes se encuentran la Falla Lila, Azúcar y Ninajasa. La falla Azúcar ubicada en la margen izquierda de la quebrada Chichahuaycco tiene rumbo N 95° y buzamiento de 60° S, se encuentra afectando rocas de los Grupos Tacaza y Barroso con un movimiento de tipo inverso, en el plano de falla se puede observar con dirección de estrías (oblicuas) que tienen relación con la segunda familia de estrías de la Falla Chichahuaycco. La Falla Azúcar, deforma rocas superiores formando pliegues y flexuras, además se puede observar en el bloque cabalgante estructuras tipo pop-up. Todas estas estructuras pueden estar relacionadas con la surgencia de aguas y lodos, la evidencia de surgencia con participación de fallas se observa en una fuente termal (Chi_2 = 28°C) que aflora en el valle muy cerca del afloramiento de aguas subterráneas y limo blanquecino.

IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS PARA ANALISIS (FUENTES DE AGUAS Y LODOS)

Durante la inspección de campo, realizado en agosto del 2011, se verifico que las descargas de aguas y lodo habían cesado, quedando en el punto de surgencia sedimentos de limo blanquecino y aguas parcialmente estancadas (flujo mínimo). Con el objetivo de evaluar la naturaleza de las descargas y su posible origen, así como la interacción de las aguas subterráneas con el entorno, se identificó tres (3) surgencias de aguas subterráneas (Cuadro 1), siendo el punto 1 la surgencia de aguas y lodo (Chi_1), el punto 2 la fuente termal en la parte inmediata superior (Chi_2) y el punto 3 la fuente termal Yumire (Chi_4). Las fuentes de aguas Chi_1 y Chi_4 corresponden a fuentes termales de flujo permanente. Para caracterizar las propiedades de los lodos blanquecinos, se muestreo los sedimentos en el punto de surgencia Chi_1 y los lodos de perforación tomados de una poza de decantación.

Cuadro 1. Fuentes inventariadas para la toma de muestras

Código	Este	Norte	Cota msnm	Caudal (l/s)	EC (uS/cm)	PH	Tº C	Descripción	Muestreo
Chi_1	769482	8386539	4737	s/c	958	7,65	3,2	Surgencia de aguas y lodo	Aguas y Lodos
Chi_2	769799	8386403	4729	2.5	783	6,89	28,7	Fuente Termal	Aguas
Chi_3	727308	8374708	4569	s/c	s/d	s/d	s/d	Poza de Lodos	Lodos
Chi_4	759383	8388966	4428	4.5	2420	6.37	73,7	Fuente Termal Yumire	Aguas

HIDROQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LODOS

ANÁLISIS DE RESULTADOS – AGUAS

Los análisis de aguas se realizaron en dos laboratorios, con el objetivo de comparar los resultados (INGEMMET y SGS), los mismos que se muestran en el cuadro 2.



Foto 2 y 3. Surgencia de aguas subterráneas y lodos (Chi_1), primer punto de muestreo de aguas y lodos

Cuadro 2. Inventario de fuentes, identificadas para la toma de muestras

CÓDIGO	LABORATORIO	ANIONES (mg/l)						CATIONES (mg/l)					
		Cl	SO4	CO3	HCO3	NO3	F	Li	K	Na	Ca	Mg	Sr
Chi-1-08-2011	SGS	4.97	491.69	0.5	111.3	0.232		0.100	3.30	53.10	178.92	6.95	1.673
Chi-1	INGEMMET	4.10	486.60	0.5	147.6	<1.000	1.6						
Chi-2-08-2011	SGS	3.08	338.72	0.5	87.1	0.031		0.120	2.90	42.80	140.52	3.95	1.463
Chi-2	INGEMMET	2.70	333.60	0.5	118.8	<1.000	2.1	0.111	4.23	39.36	199.40	4.60	1.330
Chi-4-08-2011	SGS	433.50	264.47	0.5	357.4	0.031		1.000	50.20	493.00	95.88	11.08	2.078
Chi-4	INGEMMET	458.80	256.30	0.5	476.2	<1.000	3.4	5.470	74.50	364.13	143.16	10.60	1.760

FACIES HIDROQUÍMICAS

Para establecer comparaciones entre las propiedades principales de las agua en los puntos analizados, se ha plotado los resultados en diagramas de Stiff, Piper y Scatter, los cuales ayudaran a la interpretación de los mismos (Figura 1 y 2). Los análisis se desarrollaron para parámetros de metales totales y metales disueltos.

Los resultados de los aniones y cationes mayoritarios (analizados en los laboratorios de SGS) y los resultados de la contra muestra (analizados en los laboratorios del INGEMMET), prácticamente tiene los mismo resultados, con diferencias permisibles.

Diagramas de Stiff. - Son representaciones gráficas, que muestran sintéticamente las características químicas principales de un agua, facilitando su clasificación. En la figura 1, se observan los diagramas de Stiff para cada punto inventariado, analizado y clasificado con los valores de ambos laboratorios, los valores de aniones y metales disueltos tiene la misma predominancia química, además estos gráficos nos ayudan a establecer comparaciones visuales entre ellos los mismos que nos muestran diferencia en el predominio de los iones mayoritarios. Según el análisis, la predominancia química entre metales disueltos y metales totales son las mismas y ambas corroboradas por los análisis de los dos laboratorios.

La conductividad eléctrica de las aguas termales en Chi_4 (Fuente termal Yumire), corresponden a aguas que tuvieron mayor tiempo de residencia en el subsuelo, que circularon próximos a una fuente de calor, las cuales disuelven las sales con el aumento de temperatura, llegando

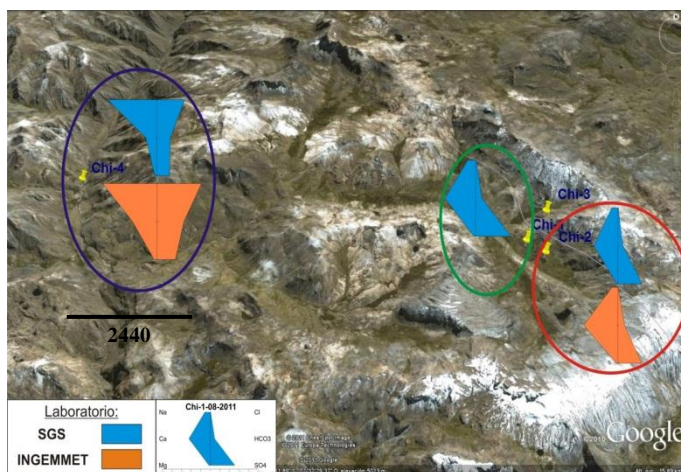


Figura 1. Diagramas de Stiff, ubicado y comparados en cada punto de surgencia de aguas, elaborado con aniones y cationes mayoritarios.

a tener cantidades elevadas de sales disueltas (2 420 uS/cm). Esta surgencia se encuentra relacionada a areniscas cuarzosas y condiciona su afloramiento a través de una falla longitudinal al valle.

Interpretaciones.- Se distinguen la existencia de dos grupos de facies químicas del agua, el primer grupo predominante en las fuentes Chi_1 y Chi_2, son aguas de tipo sulfatada cálcica (Ca-SO₄) (Figura 1). En aguas dulces, la concentración de sulfatos puede variar entre 2 y 150 mg/l, en aguas salinas asociado al Ca, puede llegar valores de 5 000 mg/l. Los valores encontrados en las fuentes Chi_1 y Chi_2 son de 491,69 mg/l y 338,72 mg/l respectivamente, que son típicas de tres puntos; del lavado de materiales sedimentarios, de oxidación de sulfuros y/o de la descomposición de sustancias orgánicas. La disolución de materiales arcillosos, representaría la mayor cantidad aportada de este ión a las aguas subterráneas, los cuáles nos indican la relación existente entre las aguas subterráneas de las muestras Chi_1 y Chi_2 con ambientes lacustres.

Como el material de los alrededores es de ambiente volcánico, se interpreta que estas aguas pueden haber adquirido su predominancia de sulfatos de los siguientes ambientes:

- Del contacto con la zona de alteración donde existe arcillas.
- Del contacto y tiempo de retención con materiales no consolidados, relleno cuaternario, con presencia de arcillas de ambientes lacustres.
- Por la disolución de minerales sulfurosos, principalmente piritita, galena y/o esfalerita.

El calcio como segundo elemento predominante, tiene composición química adquirida cuando las aguas subterráneas entran en contacto con rocas volcánicas.

Estas interpretaciones nos permiten afirmar que estas aguas proceden de la infiltración de aguas de lluvia, en la parte alta de las montañas y por medio de las fracturas de las rocas volcánicas y que en algún momento de su percolación en el subsuelo, tienen contacto con materiales sedimentarios (arcillas y limos) o minerales sulfurosos, donde adquiere la predominancia Sulfatada Cálcica.

La segunda predominancia, corresponde a la fuente termal Yumire (Chi_4), totalmente diferente a las aguas de los afloramientos Chi_1 y Chi_2, cuya composición principal corresponde, a la facies clorurada sódica (Na-Cl). Comúnmente el ión cloruro en las rocas, se presentan en escasa proporción, con elevada solubilidad de sus sales, pasan rápidamente a la fase acuosa, pudiendo alcanzar concentraciones muy altas. No forma sales de baja solubilidad, no se oxida, ni se reduce en aguas naturales, tampoco es adsorbido significativamente, ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, por lo tanto la surgencia en estas aguas se interpretan que poseen un tiempo de retención considerable y provienen de flujos regionales. El elemento de segunda predominancia (Na), tiene sales que son muy solubles y tienden a permanecer disueltas. El ión sodio puede ser adsorbido en arcillas en procesos de intercambio catiónico con otros cationes, como el calcio. En la fuente termal Yumire Chi_4, se tiene una fuerte mineralización (CE: 2 420 uS/cm) y pH neutro (6.37), de predominancia clorurada sódica. Estos en presencia de sulfuros y apoyados en un ambiente anaeróbico (por lo tanto, fuertemente reductor), generan olores fuertes por la emisión de azufre. Como en el punto donde se produce el afloramiento del manantial Yumire.

Diagramas de Piper.- Se ha utilizado este diagrama, para plotear los resultados de metales disueltos versus los aniones mayoritarios (Figura 2). Donde se tiene la posibilidad de representar las tres fuentes evaluadas en un mismo gráfico, sin dar origen a confusiones.

Interpretaciones.- En la figura 2, se observan que las aguas químicamente semejantes son Chi_1 y Chi_2 que muestran predominancia Sulfatada Cálcica, y las aguas de la fuente termal Yumire (Chi_4) tiene predominancia Clorurada Sódica, en concordancia con el diagrama de Stiff. Por lo tanto las aguas Chi_1 y Chi_2 su semejanza química nos indica que proceden del mismo lugar y tiene contacto con los mismos materiales; mientras que las aguas de la muestra Chi_4 que se encuentra en el lado opuesto del gráfico, tiene un ambiente de formación diferente.

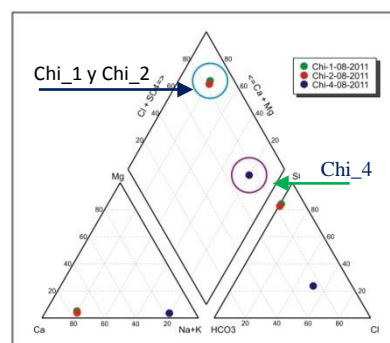


Figura 2. Diagramas de Piper, para muestras de aguas subterráneas

ANÁLISIS DE RESULTADOS – LODOS

Para identificar, si los procesos de surgencia de aguas y lodos, tienen alguna relación con los lodos utilizados en las perforaciones de exploración, se realizaron análisis de lodos en el punto de surgencia (Chi_1) y en la poza de sedimentación de lodos de retorno, utilizado en las perforaciones de exploración (Chi_3).

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

Se analizaron componentes fisicoquímicos (carbonatos y bicarbonatos), parámetros orgánicos (cloruros y sulfatos) (Cuadro 3), además de análisis de metales en lodos (en los laboratorios de SGS e INGEMMET), Rayos X (cuadro 4) y PIMA en los laboratorios del INGEMMET.

Comparando valores en los resultados (Cuadro 3), se observan variaciones considerables en los contenidos de bicarbonatos, cloruros y sulfatos, por lo cual interpretamos que ambos lodos tienen distinta composición y por lo tanto distinto origen.

Los valores de metales en lodos, se desarrolló mediante análisis de ICP en suelos (lodos secados), los mismo que arrojan valores potencialmente diferentes en cuanto a contenido metálico.

En general, los resultados obtenidos, para cada una de las fracciones correspondientes quedan reflejados en el cuadro 4. Observándose, para la gran mayoría de metales, un nivel bajo valores intercambiables, lo que implica una estabilidad apreciable de las diferentes especies químicas metálicas, por tanto, durante su movilidad los lodos mantienen sus propiedades químicas.

El Ca está presente de forma apreciable en la muestra Chi_3 (9079 mg/kg), generando una diferencia de 2327 mg/kg, en consecuencia, este elemento indica que los lodos de la fuente termal Chi_1 y Chi_3 son diferentes. En menor medida se encuentran, el Potasio (511 mg/kg), Sodio (471 mg/kg), Manganeso (251 mg/kg), Bario (107 mg/kg) y varios elementos que muestran diferencias por debajo de 100 mg/kg. Para apreciar las visibles diferencias en los lodos, se han realizado diagramas de Stiff con los elementos mayoritarios.

El Ca está presente de forma apreciable en la muestra Chi_3 (9079 mg/kg), generando una diferencia de 2327 mg/kg, en consecuencia, este elemento indica que los lodos de la fuente termal Chi_1 y Chi_3 son diferentes. En menor medida se encuentran, el Potasio (511 mg/kg), Sodio (471 mg/kg), Manganeso (251 mg/kg), Bario (107 mg/kg) y varios elementos que muestran diferencias por debajo de 100 mg/kg. Para apreciar las visibles diferencias en los lodos, se han realizado diagramas de Stiff con los elementos mayoritarios.

Cuadro 3. Resultado del análisis de lodos

COMPONENTE FÍSICOQUÍMICO	Chi_1	Chi_3	Diferencia Chi_1 – Chi_3
Carbonatos (mili mol (-)/litro)	<1	<1	0
Bicarbonatos (mili mol (-)/litro)	25	10	15
PARAMETROS INORGANICOS	Chi_1	Chi_3	Diferencia
Cloruros (mili mol (-)/litro)	0.2	1.2	-1
Sulfatos (centi mol por litro)	79.61	28.14	51.47

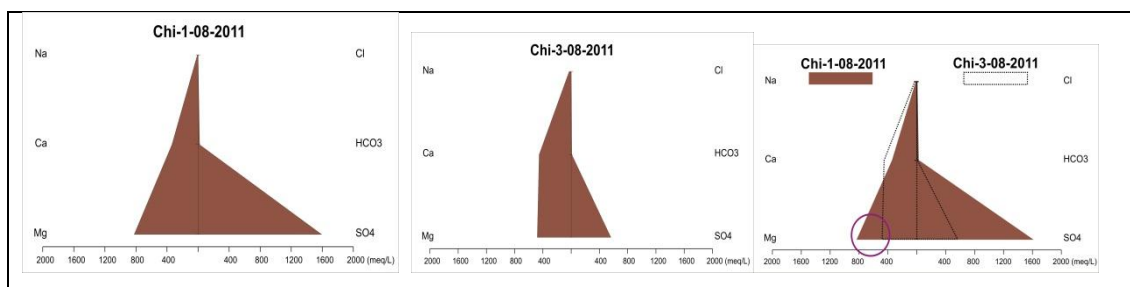


Figura 3. Diagrama de Stiff, para los elementos predominantes en los lodos Chi_1 y Chi_3, los cuales muestran gráficos comparados entre sí.

En la figura 3 se observan claras evidencias del predominio de los elementos mayoritarios. Los lodos del punto de surgencia Ch_1 tienen como elementos predominantes a los Sulfatos, en valores que llegan a 1600 meq/l y en segundo lugar al magnesio que llega a tener valores de 800 meq/l. Los lodos de la muestra Chi_3 (poza de lodos) tiene la misma predominancia química pero con valores muy inferiores (Sulfatos 600 meq/l y magnesio 400 meq/l), teniendo diferencias muy saltantes (sulfatos 1000 meq/l y magnesio de 400 meq/l), los cuales reafirman el distinto origen de los lodos. Es importante mencionar, que estas surgencias



Foto 3. Evidencia de sedimentos de lodos, de surgencias anteriores

de lodo blanquecino, no se ha producido por primera vez, se han registrado evidencias de sedimentos y productos de anteriores surgencias (Foto 3), por lo cual se descarta que estos lodos tengan alguna influencia con los lodos que se utiliza en las perforaciones de exploración.

Cuadro 4. Resultado del análisis de Lodos-Metales por ICP

N°	METALES	Chi_1	Chi_3	Diferencia
1	Plata (mg/kg)	0.3	8.9	-8.6
2	Aluminio (mg/kg)	>5000	>5000	0
3	Arsénico (mg/kg)	18	10	8
4	Boro (mg/kg)	<1	<1	0
5	Bario (mg/kg)	235	128	107
6	Berilio (mg/kg)	2.4	0.9	1.5
7	Bismuto (mg/kg)	<5	<5	0
8	Calcio (mg/kg)	6752	9079	-2327
9	Cadmio (mg/kg)	<1	<1	0
10	Cobalto (mg/kg)	13	11	2
11	Cromo (mg/kg)	17	49	-32
12	Cobre (mg/kg)	57.8	65.9	-8.1
13	Hierro (mg/kg)	>10000	<10000	0
14	Potasio (mg/kg)	1715	1204	511
15	Lantano (mg/kg)	42.4	29.4	13
16	Magnesio (mg/kg)	>10000	5834	0
17	Manganeso (mg/kg)	1638	1889	-251
18	Molibdeno (mg/kg)	3	3	0
19	Sodio (mg/kg)	198	669	-471
20	Níquel (mg/kg)	22	19	3
21	Fosforo (mg/kg)	856	1096	-240
22	Plomo (mg/kg)	27	58	-31
23	Antimonio (mg/kg)	<5	<5	0
24	Escandio (mg/kg)	3	2.5	0.5
25	Estaño (mg/kg)	<10	<10	0
26	Estroncio (mg/kg)	85	47.7	37.3
27	Titanio (mg/kg)	<100	186	0
28	Talio (mg/kg)	5	2	3
29	Vanadio (mg/kg)	40	37	3
30	Wolframio / Tungsteno (mg/kg)	<10	33	0
31	Itrio (mg/kg)	8	9	-1
32	Zinc (mg/kg)	131.8	114.5	17.3
33	Circonio (mg/kg)	2	5	-3

CONCLUSIONES

- Un sistema acuífero subterráneo que se encuentra cautivo por un cuerpo rocoso semiconfinado y que al liberar la presión hace que se eleve una columna de agua, produce el fenómeno de artesianismo (surgencia a superficie). La altura de la columna del agua dependerá de las condiciones en que se encuentre el cuerpo semiconfinado y que puede arrastrar sólidos suspendidos como limos y arcillas. Si la surgencia se produce en zonas lacustrinas (como en el área de estudio) puede arrastrar limos blanquecinos y arcillas. Por lo tanto interpretamos que este es el fenómeno ha sucedido en la Quebrada Chichahuaycco.
- El origen de las aguas subterráneas del área, son producto de la recarga a partir de la infiltración de las aguas pluviales estacionales, abundantes en la región, y de la recarga mediante infiltración de las aguas de deshielo. Precisamente esta estacionalidad es que mueve elementos finos, limos y arcillas, generando surgencias estacionales de aguas y lodos blanquecino.
- Los lodos analizados (Chi_1 y Chi_3) mediante: metales en lodos, Rayos X y PIMA, muestran propiedades diferentes, interpretándose que no son los mismos lodos que se utilizan en las perforaciones de exploración. En cambio podemos afirmar que la surgencia de lodos en este sector son cíclicas, como se reconoció en el registro fotográfico.
- Se recomienda el uso de trazadores, isótopos ambientales y radiactivos, con un rastreo sistemático, este nos podría ayudar a determinar al 100 % la procedencia de estos limos blanquecinos estacionales.

REFERENCIAS

- Ángeles, S. et al. (2004) – *Características de flujos regionales, y su manifestación, tres casos en México*, México.
- Cartwright I. et al. (2008) – *Integrating physical hydrogeology, hydrochemistry, and environmental isotopes to constrain regional groundwater flow: Southern Riverine Province, Murray Basin, Australia*. Groundwater Flow p.105-134
- Delleur J.W. (1999) – *The Handbook of groundwater engineering*. CRC Press. 945 p.
- Gea –DES Ingenieros SAC (2005) - *Evaluación Ambiental - Categoría "C" Proyecto Millo*. 18 p.
- Hoefs Jochen, (2009) - *Stable Isotope Geochemistry*. Sixth edition Springer, 281 p.
- Lamban, J & Custodio, E (1999)-*Estudio isotópico ambiental(O-D) en la unidad Anoia: Principales Zonas de recarga e implicaciones en el funcionamiento Hidrogeológico del sistema*. En Ingeniería del Agua. Vol. 6 Num. 2 p. 139-150.
- Palacion, O. et al (1993) – Geología de la Cordillera Occidental y el altiplano, al oeste del lago Titicaca, INGEMMET, Boletín serie A
- Pradeep K.; Joel R. Gat; & KLAUS F.O. (2005) – *Isotopes in the water cycle*. Springer, 373 p.
- PULIDO, J. (1978) - *Hidrogeología Práctica*. Bilbao: URMO, 314 p.
- Rollinson H.R. (1993) - *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical. 352 p.
- Vilanova E.; Mas-Pla J. & Menció A. (2008)-*Determinación de sistemas de flujo regionales y locales en las depresiones tectónicas del Baix Empordà y la Selva (NE de España) en base a datos hidroquímicos e isotópicos*. Boletín Geológico y Minero, 119 (1), p. 51-62
- Wiliam J. Deutsch (1997) – *Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination*, New York, Lewis Publishers.